

УДК 621.311

ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГЭС СИСТЕМЫ «АЗЕРЭНЕРЖИ» И ИХ ОПЕРАТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ

НАСИБОВ В.Х.

АзНИИ Энергетики и Энергопроектирования

Приводится методика аналитического построения расходных характеристик и характеристик относительного прироста расхода воды на ГЭС применением метода планирования эксперимента вместе с регрессионным анализом.

Как известно, для управления режимом работы энергосистемы, оптимизации краткосрочных режимов и оперативной дооптимизации режима необходимы аналитические расходные характеристики (РХ) и характеристики относительных приростов (ХОП) расхода энергоносителя. Для агрегатов ГЭС они строятся на основе имеющихся графиков расходно-напорных характеристик агрегатов ГЭС, представленных или заводом-изготовителем, или полученных в результате специальных опытов.

Здесь рассматриваем методику аналитического построения расходных характеристик $Q = f(H, P)$ и характеристик относительного прироста $q = f(H, P)$ для ГЭС. Анализ графиков показывает, что напорно-расходные графики представляют собою зависимости $Q=f(H)$ при различных мощностях агрегата-Р, поддерживаемых постоянной. Для получения аналитического выражения необходимо для каждого значения Р аппроксимировать зависимость $Q=f(H)$, но в этом случае получается около 30 различных уравнений только для одного агрегата и очень трудно использовать их в процессе дооптимизации режима. Для уменьшения числа аппроксимирующих уравнений зависимостей $Q = f(H, P)$ и $q = f(H, P)$ можно использовать метод факторного планирования эксперимента с аппроксимацией зависимостей $Q = f(H, P)$ и $q = f(H, P)$ линейной или квадратичной моделями в зависимости от требуемой точности. Для линейной модели расходная характеристика может аппроксимироваться билинейной характеристикой вида:

$$Q = a_0 + a_1P + a_2H + a_{12}PH \quad (1)$$

А для квадратичной модели квадратической характеристикой вида

$$Q = a_0 + a_1P + a_2H + a_{12}PH + a_{11}P^2 + a_{22}H^2 \quad (2)$$

При этом аппроксимация должна осуществляться не менее, чем для двух диапазонов изменения напора в зависимости от крутизны функции напора от расхода воды $Q=f(H)$.

Для построения этих характеристик используется метод факторного планирования эксперимента.

Для получения коэффициентов уравнений регрессии по линейной модели нужно использовать полный факторный эксперимент (ПФЭ), а по квадратичной модели можно воспользоваться ортогональным центральным композиционным планированием (ОЦКП) эксперимента.

Первая характеристика строится на основе полного факторного эксперимента (ПФЭ) $N = 2^k = 2^2 = 4$, а вторая характеристика – на основе ортогонального центрального композиционного планирования (ОЦКП) $N = 2^k + n_\alpha + n_0$, где k - число факторов (в нашей задаче $k = 2$, переменные P и H); $n_\alpha = 2k$ – число звездных точек $n_\alpha = 2 \cdot 2 = 4$; n_0 – число

экспериментальных точек в центре эксперимента $n_0 = 1$. Таким образом, число всех экспериментов $N = 2^2 + 2*2 + 1 = 9$. Матрицы планирования ПФЭ $N = 2^2 = 4$ и ОЦПК $N = 2^2 + 4 + 1 = 9$ приведены в таблице 2.3, где первые 4 эксперимента относятся к ПФЭ, а 5-9 эксперименты используются в построении модели второго порядка. Формулы для определения коэффициентов a_i приведены в [2]. Здесь переменные P и H представляются в нормированном виде, т.е. принимают значения $+1$ и -1 .

На основе приведенной методики для трех ГЭС «Азерэнержи» - Мингечаурской ГЭС, Шамкирской ГЭС и Варваринской ГЭС, которые могут принимать участие в той или иной степени в оптимизации и дооптимизации режима по активной мощности при оперативном управлении, построены аналитические РХ и ХОП агрегатов.

Для Варвара ГЭС рассматривались два уровня H и P .

1) $P = 3.5 - 5.5$ МВт; $H = 5.5 - 6.5$ м;

2) $P = 2.5 - 3.5$ МВт; $H = 4 - 5.5$ м.

Матрица планирования с исходными данными (экспериментальными) и расчетными данными, полученными по линейной и квадратичной моделям, приведены в таблице 1.

Получены следующие уравнения:

$$1) Q_1 = 89.62 + 23.37P - 9.62H - 3.37PH \quad (3)$$

$$2) Q_2 = 84.87 + 18.62P - 15.12H - 6.37PH \quad (4)$$

$$1) Q_1 = 73.84 + 22.66P - 9.58H - 3.37PH + 4P^2 + 1.4H^2 \quad (5)$$

$$2) Q_2 = 73.14 + 17P - 15H - 6.37PH + 7.5P^2 + 4.5H^2 \quad (6)$$

Среднеквадратическая ошибка моделей в экспериментальных точках получилась: при линейной модели $\sigma_{Q1} = 2.0 \text{ м}^3/\text{с}$ (2.3%); $\sigma_{Q2} = 4.83 \text{ м}^3/\text{с}$ (6.04%), при квадратичной модели $\sigma_{Q1} = 9.4 \text{ м}^3/\text{с}$ (10.9%); $\sigma_{Q2} = 3.2 \text{ м}^3/\text{с}$ (4%)

Из полученных результатов следует, что при напоре 5.5-6.5 м большей точностью обладает билинейная модель, а при напоре от 4 до 5.4 м – квадратичная модель, поэтому принимаем:

при $H = 5.5-6.5$ м $Q_1 = 89.62 + 23.37P - 9.62H - 3.37PH$ (СКО = 2.3%)

при $H = 4-5.5$ м $Q_2 = 73.14 + 17P - 15H - 6.37PH + 7.5P^2 + 4.5H^2$ (СКО = 4%)

ОЦКП второго порядка

$$N = 2^2 = 4 \quad \alpha = 1$$

$$n_\alpha = 4 \quad \varphi = 0.6667 \quad n_0 = 1$$

Таблица 1

Матрица планирования для Варвара ГЭС

	x_0	x_1 P	x_2 H	x_3 $x_1^2 - \varphi$	x_4 $x_2^2 - \varphi$	x_1x_2	\hat{y}_1 Q_1 л/кв	\hat{y}_2 Q_1 л/кв	y_1 Q_1	y_2 Q_2
1	+	-	-	+0.33	+0.33	+	72.5 62.7	75.0 76.7	72.5	75
2	+	+	-			-	125.9 114.8	124.9 123.5	126	125
3	+	-	+			-	60.0 50.3	57.5 59.5	60	57.5
4	+	+	+			+	100.0 87.5	82.0 80.7	100	82
5	+	-	0	+0.33	-0.66	0	66.2 55.1	66.2 63.6	67.5	65

6	+	+	0	+0.33	-0.66		113.0 100.5	103.5 97.6	110	92.5
7	+	0	-	-0.66	+0.33		99.2 84.8	100.0 92.6	96.5	93
8	+	0	+	-0.66	+0.33		80.0 65.6	69.7 62.6	77.5	60.5
9	+	0	0	-0.66	-0.66	0	89.6 73.8	84.8 73.1	86	80
+1 -1	5.5 МВт 3.5 МВт		6.5 м 5.5 м							
+1 -1	3.5 МВт 2.5 МВт		5.5 м 4.0 м							

Для агрегатов Мин.ГЭС приняты следующие два уровня:

- 1) P = 30-65 МВт, H = 54-68 м
- 2) P = 30-40 МВт, H = 40-54 м

Матрица планирования с исходными данными, взятыми из напорно-расходной характеристики Мин.ГЭС, а также расчетные значения, полученные по уравнениям для первого и второго уровней, приведены в таблице 2.

Уравнения расходных характеристик для первого и второго уровней получились в следующем виде:

$$Q_1 = 89.8 + 28.55P - 8.55H - 4.16PH + 1.33P^2 + 3.33H^2 \quad (7)$$

$$Q_2 = 87.14 + 10.23P - 13.6H - 1.5PH + 6.25H^2 \quad (8)$$

СКО моделей в экспериментальных точках получились:

$$\sigma_{Q1} = 10.4 \text{ м}^3/\text{с} \quad \text{или} \quad 3.78\%$$

$$\sigma_{Q2} = 3.33 \text{ м}^3/\text{с} \quad \text{или} \quad 1.24\%$$

Таблица 2

Матрица планирования для Мингечаурской ГЭС

	x ₁ P	X ₂ H	y ₁ Q ₁	ŷ ₁ Q ₁	Y ₂ Q ₂	Ŷ ₂ Q ₂	q ₁	q ₁	q ₂	q ₂
1	-	-	70	70.3	95	95.3	2.3	2.311	3.2	3.205
2	+	-	136.7	127	119	119.1	2.1	2.101	2.9	2.905
3	-	+	60	61.5	70	71.1	2.0	2.04	2.3	2.345
4	+	+	110	110.3	87.7	88.5	1.7	1.73	2.2	2.24
5	-	0	64	62.9	78.3	76.9	2.1	2.076	2.6	2.55
6	+	0	118.7	119.7	98.3	97.4	1.8	1.816	2.4	2.35
7	0	-	100	101.6	105.4	107.0	2.1	2.106	3.0	3.055
8	0	+	85.3	87.9	79.7	79.8	1.8	1.78	2.3	2.28
9	0	0	91.7	89.8	89.0	87.1	1.9	1.84	2.5	2.45
+1 -1	65 МВт 30 МВт		68 м 54 м							
+1 -1	40 МВт 30 МВт		54 м 40 м							

Для Шамкирской ГЭС приняты следующие два уровня

1) P = 50-190 МВт, H = 48-55 м

2) P = 50-140 МВт, H = 37-48 м

Матрица планирования с исходными данными, взятыми из напорно-расходной характеристики Шамкирской ГЭС, а также расчетные значения, полученные по уравнениям для первого и второго уровней, приведены в таблице 3.

Таблица 3

Матрица планирования для Шамкирской ГЭС

	x ₁ P	X ₂ H	y ₁ Q ₁	ŷ ₁ Q ₁	Y ₂ Q ₂	Ŷ ₂ Q ₂	q ₁	q ₁	q ₂	q ₂
1	-	-	70	70.3	95	95.3	2.3	2.311	3.2	3.205
2	+	-	136.7	127	119	119.1	2.1	2.101	2.9	2.905
3	-	+	60	61.5	70	71.1	2.0	2.04	2.3	2.345
4	+	+	110	110.3	87.7	88.5	1.7	1.73	2.2	2.24
5	-	0	64	62.9	78.3	76.9	2.1	2.076	2.6	2.55
6	+	0	118.7	119.7	98.3	97.4	1.8	1.816	2.4	2.35
7	0	-	100	101.6	105.4	107.0	2.1	2.106	3.0	3.055
8	0	+	85.3	87.9	79.7	79.8	1.8	1.78	2.3	2.28
9	0	0	91.7	89.8	89.0	87.1	1.9	1.84	2.5	2.45
+1	90 МВт		55 м							
-1	50 МВт		48 м							
+1	140 МВт		48 м							
-1	50 МВт		37 м							

Уравнения расходных характеристик для первого и второго уровней получились в следующем виде:

$$Q_1^{KB} = 257.64 - 17.5P + 149.5H - 12.5PH + 4.75P^2 + 3.25H^2 \quad (9)$$

$$Q_1^J = 265 - 17.5P + 150H - 12.5PH \quad (10)$$

$$Q_2^{KB} = 244.1 + 120P - 32H - 16.75PH + 7.5P^2 + 11H^2 \quad (11)$$

$$Q_2^J = 251 + 120.5P - 32H - 16.5PH \quad (12)$$

СКО моделей в экспериментальных точках получились

$$\sigma_{Q1,KB} = 0.97 \text{ м}^3/\text{с} \quad \text{или} \quad 0.37\%$$

$$\sigma_{Q1,J} = 2.7 \text{ м}^3/\text{с} \quad \text{или} \quad 1.03\%$$

Сравнивая результаты, легко заметить, что квадратичные модели лучше описывают характеристики, и в дальнейшем только они используются.

Из полученных уравнений следует, что при напоре H = 48-55 м и H = 37-48 м большей точностью обладает квадратичная модель

$$Q_1^{KB} = 257.64 - 17.5P + 149.5H - 12.5PH + 4.75P^2 + 3.25H^2 \quad (13)$$

$$Q_2^{KB} = 244.1 + 120P - 32H - 16.75PH + 7.5P^2 + 11H^2 \quad (14)$$

Расходные характеристики $Q = f(P, H)$ для указанных ГЭС в натуральных значениях переменных P, H приведены ниже.

Для Варвара ГЭС

$$Q_1 = 275.66 - 65.2P - 149.5H - 17PH + 30P^2 + 8.05H^2 \quad (H = 4-5.5 \text{ м})$$

$$Q_2 = 186.84 + 27.06P - 56.06H - 6.74PH + 4P^2 + 5.6H^2 \quad (H = 5.5-6.5 \text{ м})$$

Для Мин.ГЭС

$$Q_1 = 753.6 + 3.23P - 23.66H - 0.03PH + 0.001P^2 + 0.2H^2 \quad (H = 54-68 \text{ м})$$

$$Q_2 = 953.68 + 4.05P - 37.26H - 0.043PH + 0.38H^2 \quad (H = 40-54 \text{ м})$$

Для Шамкир ГЭС

$$Q_1 = 749.6 + 5.31P - 36.63H - 0.074PH + 0.0037P^2 + 0.44H^2 \quad (H = 37-48 \text{ м})$$

$$Q_2 = 981.34 + 4.5P - 38.78H - 0.05PH + 0.0006P^2 + 0.39H^2 \quad (H = 48-55 \text{ м})$$

При оптимизации режима по активной мощности нужны характеристики относительных приростов расхода воды на ГЭС. В соответствии с расходными характеристиками ГЭС построены характеристики относительных приростов расхода воды на ГЭС, согласно выражению: $q = \partial Q / \partial P$.

Характеристики относительного прироста расхода воды на Мин.ГЭС и Шамкир ГЭС в натуральных значениях мощности агрегата P (МВт) и напора (м) получились следующие:

Для Мин.ГЭС

$$q_1 = 18.15 - 0.0266P - 0.5H + 0.0004PH + 0.004H^2 \quad (H = 40-54 \text{ м})$$

$$q_2 = 11.2 - 0.008P - 0.218H - 0.000067PH + 0.000036P^2 + 0.001H^2 \quad (H = 54-68 \text{ м})$$

Для Шамкир ГЭС

$$q_1 = 19.8 - 0.031P - 0.688H + 0.00026PH + 0.00009P^2 + 0.0072H^2 \quad (H = 37-48 \text{ м})$$

$$q_2 = 8.72 + 0.0011P - 0.22H - 0.0001PH + 0.00001P^2 + 0.0019H^2 \quad (H = 48-55 \text{ м})$$

1. Гусейнов Ф.Г., Мамедяров О.С. Планирование эксперимента в задачах электроэнергетики. Москва, Энергоатомиздат, 1988г.,-150 с.
2. Мамедяров О.С. Регрессионный анализ установившихся режимов электрической системы. Электричество 1982г. №5, с.10-24.

«AZƏRENERJİ» SİSTEMİNDƏKİ HİDRO ELEKTRİK STANSİYALARIN XARAKTKRİSTİKALARININ QURULMASI VƏ ONLARIN OPERATİV DƏQİQLƏŞDİRİLMƏSİ

NƏSİBOV V.X.

Məqalədə «Azərenerji» sisteminin üç əsas hidroelektrik stansiyalarının suyun sərfiyyatı və onun sərfinin xüsusi artım xarakteristikalarının analitik yolla qurulması məsələlərinə baxılmışdır. Bu zaman eksperimentin planlaşdırılması metodundan və reqressiya analizindən istifadə olunmuşdur.

CONSTRUCTION OF CHARACTERISTICS OF HYDROELECTRIC POWER STATION OF SYSTEM " AZERENERGY " AND THEIR OPERATIVE CORRECTION

NASIBOV V.Kh.

The technique of analytical construction of account characteristics and characteristics of a relative gain of the charge of water on hydroelectric power station by application of a method of planning of experiment together with regression the analysis is resulted.